Centrales électroniques

L'invention du transistor, en 1947, par William Shockley, John Bardeen et Walter Brattain, physiciens aux Laboratoires Bell, déclencha une révolution dans l'électronique, discipline où régnait, depuis 1906, le vénérable tube à vide. Ce dernier, conçu à l'origine par le physicien américain Lee De Forest, ne pouvait plus répondre aux nouveaux besoins. De grandes quantités d'électricité étaient nécessaires pour porter à incandescence le filament se trouvant à l'intérieur et à partir duquel étaient émis des électrons soumis ensuite à divers types de contrôle. Un outil à trois électrodes appelé triode, créé à cet effet par De Forest, permettait de canaliser le flux des électrodes vers une plaque chargée positivement à l'intérieur du tube. Les premiers calculateurs électroniques, ainsi que la plupart de ceux qui suivraient, furent conçus selon ce principe, en utilisant les zéros et les uns de l'arithmétique binaire, afin de réaliser des opérations logiques et mathématiques. Le zéro peut être représenté par l'absence d'un courant d'électrons en direction de la plaque; un courant faible, néanmoins détectable, représentera le 1.

L'avénement du filament chaud dans l'électronique n'eut pas toujours des conséquences heureuses. Les tubes étaient encombrants et produisaient tant de chaleur que le système de refroidissement indispensable aux gros modèles de ce type, consommait presque autant de puissance que les tubes eux-mêmes. En outre, ces derniers étaient peu fiables et claquaient comme des ampoules. En fait, la praticabilité des ordinateurs montés avec des tubes était limitée par le taux de panne des tubes. Un ordinateur en comportant des milliers pouvait ne fonctionner guère plus d'une heure entre deux pannes. Si les ordinateurs devaient continuer à être utilisés, il fallait trouver un moyen de remplacer les tubes.

Le transistor constitua la solution à ces problèmes. Au bout de cinq ans, furent mis en service des transistors promis à une durée quasi indéfinie. Ils consommaient beaucoup moins de puissance que les tubes à vide et, de ce fait, ne produisaient qu'une chaleur négligeable. Ils étaient, de plus, si petits qu'ils furent d'abord utilisés pour les appareils de surdité. Ce n'est que plus tard que furent lancées les radios à transistors. Bientôt, les fabricants d'ordinateurs remplacèrent les milliers de tubes à vide de leurs circuits logiques par des transistors. IBM produisit sa première calculatrice transistorisée en 1955. Au lieu des 1 200 tubes à vide normalement exigés pour une calculatrice de ce niveau, elle comportait 2 200 transistors. Pourtant, la nouvelle machine était plus petite, ne nécessitait pas de refroidissement et consommait 95 % de puissance de moins que le modèle à tubes. Deux ans plus tard, et dix ans après la naissance du transistor, l'industrie électronique des États-Unis en produisait 28 millions d'unités pour une valeur de 68 millions de dollars.

La fiabilité et les dimensions réduites des transistors (ceux utilisés comme commutateurs binaires dans l'ordinateur IBM tenaient dans une capsule protectrice de 6 mm de diamètre pour quelque 6 mm de hauteur), permirent aux concepteurs d'ordinateurs de rêver de machines toujours plus complexes, dotées de plus en plus de transistors. La miniaturisation progressive stimula ce type de recherche

jusqu'au moment où il devint évident que toute amélioration des transistors ne représenterait qu'un faible bénéfice par rapport à l'effort consenti.

Le problème venait de ce que les transistors, à l'instar des autres composants du circuit, étaient des éléments séparés qui devaient être soudés ensemble. À mesure que les ordinateurs, et leurs circuits, devenaient plus complexes, le nombre de connexions devint de plus en plus grand, augmentant à proportion les chances d'un branchement défectueux. Néanmoins, une miniaturisation encore plus poussée était déjà considérée comme indispensable dans la réalisation d'ordinateurs plus rapides. Visiblement, il fallait vaincre cet obstacle, ou alors l'utilité des ordinateurs demeurerait limitée.

Le circuit intégré, ou puce, offrit la solution à ce problème. La puce constitue une collection de minuscules transistors qui sont reliés ensemble selon le processus même permettant la création du transistor. Le progrès est considérable. Tout d'abord, le nombre de soudures est très réduit. Ainsi, une puce contenant 1 000 transistors peut n'exiger qu'une dizaine de connexions soudées aux autres composants du circuit. Une plaque comportant le même nombre de transistors séparés imposerait au moins 3 000 soudures. En second lieu, la fiabilité du câblage interne de la puce est comparable à la sûreté des transistors eux-mêmes.

L'évolution des puces suivit une seule règle pendant plus de trente ans après son invention : rassembler des fonctions électroniques toujours plus nombreuses sur un espace de plus en plus réduit, ce que les spécialistes de ce domaine nomment accroissement de l'échelle d'intégration. Le premier circuit intégré ne comportait que cinq composants électroniques et ne pouvait réaliser qu'une seule opération : produire un courant alternatif quand il était branché à une batterie. Aujourd'hui, une puce de cinq millimètres carrés, épaisse d'un demi-millimètre peut contenir l'électronique d'un ordinateur qui, quinze ans auparavant, aurait occupé une pièce de 5 mètres carrés.

Outre ce gain d'espace, la miniaturisation améliore les performances des circuits intégrés. À mesure que diminuent les dimensions des conducteurs et des éléments du circuit, le temps nécessaire aux signaux électriques pour circuler dans les circuits réduit d'autant. Le temps de traitement diminue également et les ordinateurs sont capables de faire davantage de calculs en moins de temps et pour un moindre coût. Par exemple, au début des années 1970, époque de l'intégration à grande échelle (LSI), les ordinateurs avaient une densité électronique d'environ 5 800 circuits par cm^3 ; traiter une instruction prenait moins d'un millionième de seconde et le coût de traitement d'un million d'instructions était tombé à 2 cents. En 1980, l'intégration à très grande échelle (VLSI) était parvenue à maturité. La densité électronique dépassait 600 000 circuits par cm^3 et le temps d'exécution était inférieur à 5 nanosecondes (milliardièmes de seconde). Le coût d'un million d'opérations était cent fois moindre. En outre, l'intervalle moyen entre deux pannes dans un ordinateur était passé de quelques centaines d'heures en 1970 à quelques années en 1980.

Une manière de décrire ce taux de progrès est connue comme loi de Moore, d'après Gordon Moore, l'un des fondateurs de Fairchild Semiconductor Corporation, la première firme à fabriquer des puces. Lorsqu'on lui demanda, en 1964, de prédire à quelle vitesse allaient progresser les puces dans les années à venir, après réflexion, Moore répondit que les circuits intégrés doubleraient en complexité chaque année. Le rythme du progrès n'a pas diminué puisque les fabricants

produisent actuellement des puces comportant plus d'un million de composants.

Pour parvenir à ce degré de complexité, les circuits intégrés ont subi une stupéfiante évolution sur deux fronts. Aux plans scientifique et technique, le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles conceptions rendit possible, du moins en théorie, la miniaturisation du transistor qui permit de les accumuler en très grand nombre. Dans le domaine de la fabrication, il fallut inventer et perfectionner des méthodes et des procédés, afin de convertir la théorie en pratique. Et l'évolution des puces continue. En route vers le circuit intégré disposant d'un milliard de transistors, les concepteurs de puces repoussent les limites de la physique dans le but de fabriquer des circuits intégrés encore plus rapides et plus puissants, les scientifiques améliorent leur conception des matériaux spéciaux servant à fabriquer les transistors, et les constructeurs inventent de nouvelles méthodes, afin de produire, à faible coût et avec fiabilité, ces chefs-d'œuvre de miniaturisation.

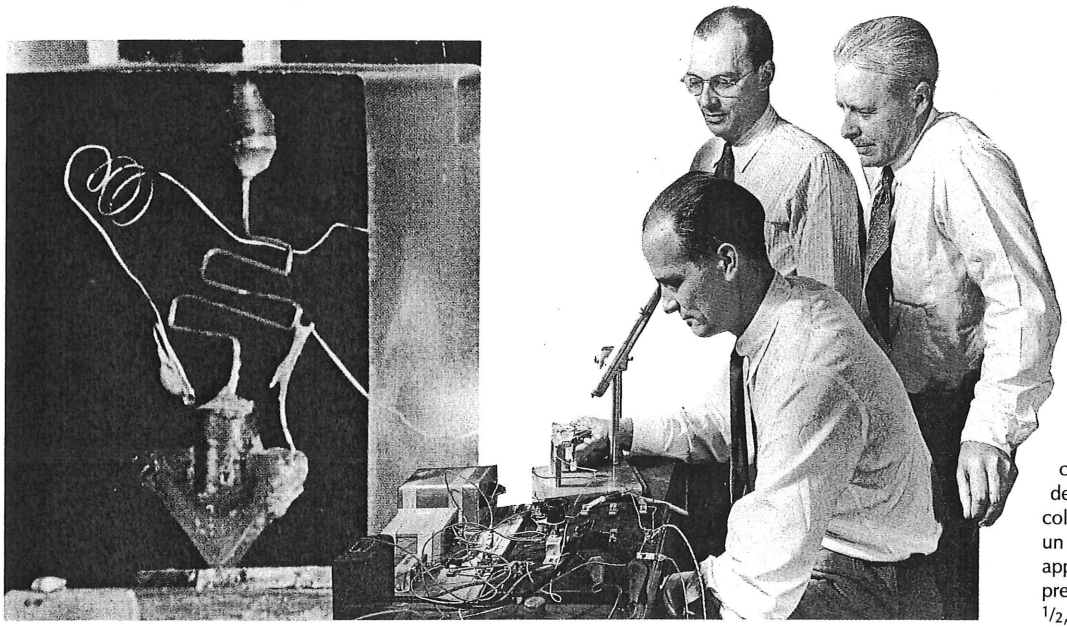
LES DÉBUTS

Le savant anglais G.W.A. Dummer fut le premier à concevoir la possibilité de « circuits électriques sans fils ». Il travaillait pour l'établissement de recherches des télécommunications de son gouvernement à Malvern, en Angleterre, où il dirigeait le travail de routine d'un groupe d'essayeurs surnommé le Dumpire en son honneur. Par « sans fils », il entendait des circuits électriques sans fils de liaison et sans points de soudure. S'adressant à un groupe d'ingénieurs à Washington en 1952, Dummer offrit une bonne description de ce que serait une puce : « il semble aujourd'hui possible d'envisager un matériel électronique d'un seul bloc, sans fils de liaisons. Ce bloc pourrait consister en couches de matériaux isolants, conducteurs, redresseurs et amplificateurs, les fonctions électriques étant connectées directement en découpant des régions dans les différentes couches. »

Pour révolutionnaire que parût l'idée de Dummer à cette époque, elle n'était en réalité qu'une extension logique du niveau technique atteint par le transistor. Ceux fabriqués en 1952 étaient du type appelé transistor à jonctions. Inventé quelques années auparavant aux laboratoires Bell par William Shockley, il était formé de couches, tel un sandwich. Le pain ainsi que le jambon étaient de fines tranches de germanium ou de silicium, substances cristallines non métalliques, membres d'une même famille de matériaux appelés semi-conducteurs. À l'inverse des isolants, comme le verre, qui résistent toujours au passage de l'électricité, ou des conducteurs, tel le cuivre, qui la laissent toujours passer librement, les semi-conducteurs peuvent être rendus conducteurs ou isolants.

À l'état pur, les semi-conducteurs ne permettent pas aisément le passage de l'électricité. Pour le rendre plus facile, il faut combiner avec le matériau des traces d'impuretés dites dopants. Selon la nature de ces impuretés, les semi-conducteurs peuvent être rendus aptes à conduire le courant selon le processus habituel, c'est-à-dire grâce à un flux d'électrons comme dans un fil métallique, ou par l'intermédiaire de « trous » ou lacunes, des « absences d'électrons » chargés positivement qui se déplacent à travers le matériau presque comme les électrons.

Le phosphore, par exemple, dopant d'usage courant, possède dans sa structure atomique un électron de plus que nécessaire pour qu'un atome de ce dopant s'ajuste à la maille cristalline du silicium. Cet électron est libre de se déplacer à travers le matériau en réponse à la tension d'une batterie, exactement comme des

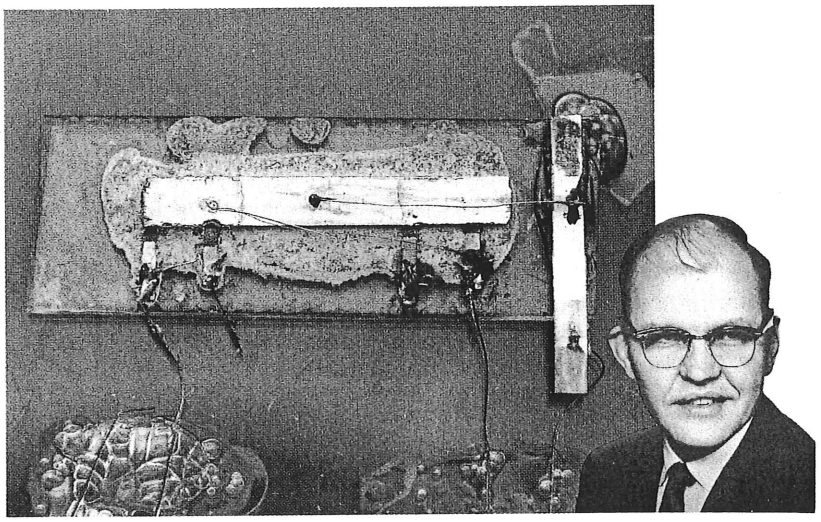


John Bardeen et Walter Brattain *(debout, de gauche à droite),* chercheurs aux laboratoires Bell, regardent par-dessus l'épaule de leur collègue William Shockley, assis devant un microscope et certains autres appareils qui ont servi à l'invention du premier transistor, visible à l'échelle 1/2, à l'extrême gauche.

électrons libres dans un fil de métal. Les semi-conducteurs présentant un excès d'électrons et un flux d'électricité négative sont appelés semi-conducteurs de type N. Les semi-conducteurs de type P sont ceux qui ont été dopés avec un élément tel le bore qui possède un électron de moins que nécessaire pour s'intégrer parfaitement au cristal de silicium. Ce déficit laisse un trou, une place dans le cristal où un électron pourrait se loger. Relier un tel matériau à une batterie permet aux électrons voisins de remplir ces trous. Ceci crée néanmoins un nouveau trou chargé positivement. À ce moment, en effet, un trou est porteur de charge positive et peut transporter le courant au même titre qu'un électron. Dans ce type de matériau, il n'existe pas de mouvement continu d'électrons mais seulement de trous. Il est appelé semi-conducteur de type P.

Le transistor à jonctions de Shockley comportait une tranche de matériau type P, placée entre deux tranches de matériau type N. La tranche du dessus, dite émetteur, était plus petite que les deux autres, un peu comme une petite colline s'élevant sur une plaine. L'électricité circulait de l'émetteur vers la tranche du bas, dite collecteur, uniquement quand un courant positif de contrôle était appliqué à la tranche du milieu, ou base. Les spécialistes appellent bipolaire cette sorte de transistor, parce qu'une partie du courant a été fournie par un transfert d'électrons (le pôle négatif) et l'autre par les trous (le pôle positif).

Dans certaines limites, un accroissement du courant à travers la base produit un accroissement du courant au collecteur. Cette propriété était commode pour des calculatrices. Un faible courant à la base produit un faible courant au collecteur, un zéro en termes binaires. Un courant plus fort à la base et un courant plus fort au collecteur signifient le un. Le transistor exigeait trois fils, l'un relié à l'émetteur, un autre à la base et le troisième au collecteur. Ces conducteurs étaient à leur tour soudés à d'autres éléments qui pouvaient être d'autres transistors, afin de créer un circuit. Les laboratoires Bell, plutôt que de garder le nouveau produit pour eux, le mirent à la disposition de toute compagnie qui en manifestait le désir. Examinant cette technologie, Dummer proposa de bâtir de nombreuses petites collines sur une seule grande plaine au lieu d'avoir chaque colline avec sa propre plaine.



Le premier circuit intégré, inventé en 1958 par Jack St. Clair Kilby de Texas Instruments, associait tous les éléments de base d'un circuit sur un seul morceau de germanium long d'environ 1 centimètre *(lame horizontale)*. L'ensemble était maintenu par collage, des fils d'or assurant les interconnexions.

Conséquence du processus, les transistors et autres composants électroniques construits en même temps pourraient être liés ensemble pour former toutes sortes de dispositifs électroniques utiles. Peu après qu'il eut prononcé son discours dans la capitale américaine, le projet de Dummer de fabriquer des transistors sans fils tomba à l'eau quand son agence, suite à la pénurie de silicium, limita la fourniture de ce matériau à des projets jugés plus importants. Bien qu'il poursuivît sa campagne, il ne réussit jamais à obtenir l'appui de son pays, et ne fabriqua jamais une puce qui fonctionne. Un seul modèle de circuit intégré, construit en silicium en 1957, représenta le point culminant de la croisade menée pendant dix ans par Dummer pour amener quelqu'un à croire à ses circuits sans fils. Dummer, déclara plus tard un de ses collègues, « prêchait l'évangile des circuits intégrés bien avant que quiconque, lui compris, ait la moindre idée de la manière d'en fabriquer réellement ». Après cette expérience, Dummer décida de se retirer et écrivit des livres. Aurait-il été meilleur prêcheur que la puce serait devenue une réalité plus tôt.

SUBMERGÉ PAR LES TRANSISTORS

À l'époque où Dummer abandonnait son projet, la complexité de l'électronique transistorisée s'était spectaculairement accrue, et nul ne pouvait prévoir quand cela finirait. La tyrannie du nombre menaçait de bloquer les progrès des transistors, en raison de l'écrasante multitude de connexions nécessaires pour relier ensemble de gigantesques quantités de transistors. Les ingénieurs systèmes, utilisant les transistors pour remplacer les tubes à vide, avaient trouvé que la fiabilité des transistors rendait possible la construction de calculatrices de complexité croissante, la seule limite étant la fiabilité des soudures. Autrement dit, la probabilité qu'une connexion se défasse quelque part dans le labyrinthe de fils reliant d'innombrables transistors était supérieure à celle d'une panne de transistor. Les chercheurs, ayant deviné tout l'intérêt de systèmes plus complexes, ne pourraient s'estimer satisfaits tant que ce nouvel obstacle n'était pas surmonté.

Les spécialistes de l'espace étaient dans la même situation. Rêvant du jour où ils pourraient envoyer une fusée sur la Lune, ils envisageaient un ordinateur de

guidage contenant 10 millions de composants. Chacun d'eux, et chaque soudure dans ces circuits, aurait à fonctionner à la demande, possibilité extrêmement peu vraisemblable avec la technologie des transistors alors disponible. Même si un fonctionnement parfait pouvait être garanti, il aurait fallu disposer d'une calculatrice énorme, bien trop grande pour tenir dans une fusée de taille raisonnable. Ce gigantisme était également inacceptable pour une autre raison. Dans une telle calculatrice les impulsions électriques étant envoyées d'un point à un autre, elles subissent, même à une vitesse proche de celle de la lumière, des retards intolérables dans le contrôle d'une fusée où la capacité à résoudre des équations compliquées en quelques millisecondes est essentielle.

Les forces armées américaines étaient particulièrement inquiètes de constater que le labyrinthe des liaisons soudées allait devenir si peu fiable qu'il ne pourrait convenir à l'électronique du champ de bataille où les armes doivent fonctionner à chaque fois du premier coup. Prévoyant ces difficultés dès 1950, la Marine avait lancé le projet Tinkertoy. Elle voulait la mise au point de modules électroniques compacts qui s'emboîteraient les uns dans les autres, afin de créer toute une variété de systèmes électroniques: radios, radars, fusées pour bombes ou obus, et ordinateur. Basé sur des tubes à vide plutôt que des transistors, Tinkertoy fut abandonné. En 1953, les transistors devinrent la base d'un programme similaire de l'Armée, dans lesquels les assemblages étaient appelés micromodules. Transistors et autres composants devaient être assemblés sur de petites tranches de céramique ayant à peu près le diamètre d'un crayon. Ces tranches devaient être empilées puis reliées par des fils tout autour des bords. La pile de rondelles aurait alors été enfichée sur des circuits imprimés. Des modèles d'essai fonctionnèrent, mais le plan Micromodule ne réduisait pas le nombre de connexions soudées, il ne faisait que changer leur aspect.

L'Armée s'était associée à la firme électronique Texas Instruments, afin d'accélérer le plan Micromodule. L'un des ingénieurs travaillant sur le projet, Jack St Clair Kilby, était venu chez Texas après avoir travaillé plusieurs années chez Centralab, à Milwaukee. Cette compagnie avait participé au projet Tinkertoy, de sorte que Kilby connaissait de première main les défauts du projet antérieur et sentait que Micromodule n'apporterait guère d'améliorations. L'approche de l'Armée était un exemple, selon lui, de « mauvaise réponse à une mauvaise question ». Le Signal Corps avait demandé comment relier plus facilement ces composants; Kilby se demandait comment éliminer ces connexions. Kilby était inventeur dans l'âme. Il n'avait pas encore entendu parler de l'Anglais Dummer quand, en juillet 1958, alors que presque tout le monde à Texas Instruments était parti en vacances, il se mit à réfléchir à ce qu'il pourrait faire avec un morceau de silicium pour renverser la tyrannie du nombre. Il semble que Kilby connaissait beaucoup mieux que Dummer les principes de base des semi-conducteurs. Par exemple, grâce à son travail sur les micromodules, il savait que les propriétés de semi-conduction du silicium dopé pouvaient servir à fabriquer des transistors et même un deuxième dispositif électrique utile, appelé diode, qui fournit un courant à sens unique dans un circuit. Kilby savait également que des chercheurs avaient récemment découvert comment changer le silicium en silice, ou quartz — l'un des meilleurs isolants connus — directement sur la tranche de silicium. Ce procédé allait permettre de créer des zones conductrices ou isolantes sur la même tranche de matériau afin de connecter ou isoler différents composants. Kilby

pensait, en outre, qu'il pourrait faire une résistance en silicium, ce composant électronique utilisé dans les circuits pour limiter le passage du courant. Il réalisa de même que les capacités, composants électroniques utilisés afin de stocker ou retarder le courant, pourraient être formées à la jonction entre les zones de type N et celles de type P du silicium.

Kilby avait calculé comment fabriquer quatre des cinq éléments de base de tout circuit électronique — transistors, diodes, résistances et capacités —, entièrement à partir du silicium (le cinquième élément de base, le transformateur et autres dispositifs à induction, est radicalement incompatible avec la technologie des semi-conducteurs; là où un inducteur est nécessaire, il demeure un composant séparé dans le circuit). « Personne, déclara plus tard Kilby, n'aurait alors fabriqué ces composants à partir d'un matériau semi-conducteur qui ne faisait ni des résistances ni des capacités de qualité, et était jugé incroyablement coûteux. Produire une résistance à partir d'un semi-conducteur semblait une folie. »

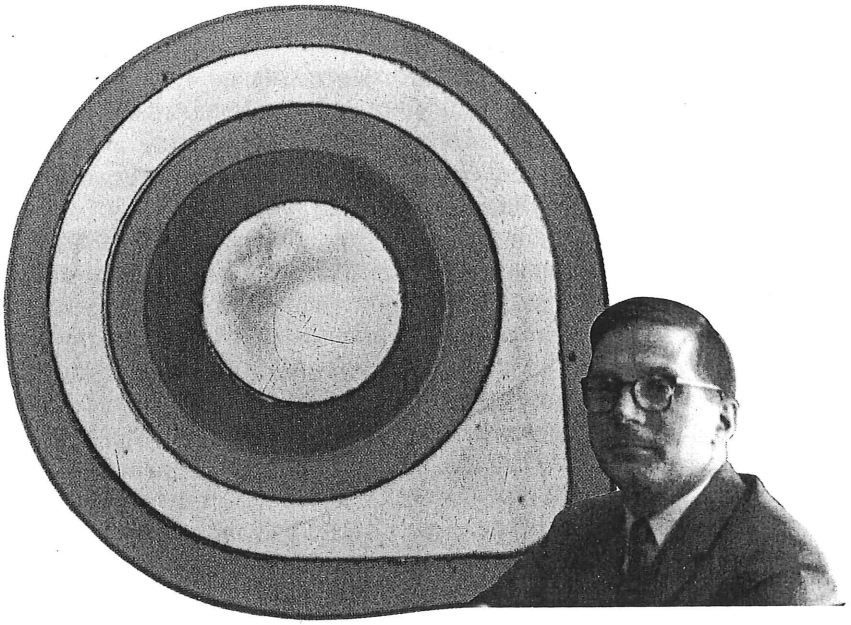
Fou ou pas, Kilby voyait où menaient ces idées. S'il pouvait réunir tous les éléments d'un circuit sur une même pièce de silicium et les relier grâce aux fils déposés à la surface de ce morceau, il aurait réalisé un dispositif monolithique, ainsi nommait-il le circuit électronique « d'un seul bloc » que Dummer avait envisagé dix ans auparavant. Kilby nota l'idée sur son carnet fin juillet et la première puce fut prête à être essayée le 12 septembre 1958. Long d'environ 1 centimètre et plus étroit qu'un cure-dents, le premier circuit intégré au monde ne renfermait que cinq composants reliés par des fils qui dépassaient d'une fine tranche de germanium. (La plupart des employés de Texas Instruments étant en vacances, Kilby n'avait pu trouver un morceau de silicium approprié.) Mais le dispositif fonctionnait, et Texas annonça l'invention de la puce, en janvier 1959.

LA MULTIPLICATION DES TRANSISTORS

Alors que ces événements se déroulaient chez Texas Instruments, le physicien Jean Hoerni, l'un des fondateurs de la California's Fairchild Semiconductor, réalisait un nouveau type de transistor à jonction qui allait vite remplacer le type sandwich dont Kilby s'était servi pour fabriquer sa puce. Hoerni découvrit qu'en emboîtant des couches de silicium de type P et N de l'épaisseur de quelques atomes, une couche disposée sur la suivante telles des cuvettes empilées, il pouvait disposer d'un transistor meilleur que celui doté d'une large zone de contact obtenue en empilant une sorte de silicium au-dessus d'une autre à la façon d'une meule. Il tira également profit du fait que de petites régions d'un cristal de silicium, dopées en profondeur pendant la fabrication pour être de type N ou P, pouvaient plus tard être redopées afin de devenir du type opposé.

En appliquant ces idées, le physicien fut en mesure de créer un transistor plat qui ressemblait assez à une cible à trois zones. L'anneau extérieur, un contact pour le collecteur sous-jacent, était fait du silicium sur lequel le transistor devait être bâti, par exemple de type N. L'anneau du milieu, ou base, consistait en un cercle sur la tranche que Hoerni redopait pour obtenir du silicium type P, et dopait à nouveau pour faire une pastille centrale de type N qui servait d'émetteur. Après avoir dopé les régions choisies, Hoerni recouvrait le transistor d'une fine couche de silice, laissant de petits trous dans cette couche protectrice pour fournir les points de contact appropriés.

L'invention de Hoerni, dite transistor planaire parce que sa surface était plate,



Le premier transistor planaire *(plat)*, présenté avec son inventeur, le physicien suisse Jean Hoerni de Fairchild Semiconductor, avait environ 1,5 mm de diamètre. D'une construction plus simple que les dispositifs antérieurs, il devint la base des premières puces produites en masse *(à l'opposé)*.

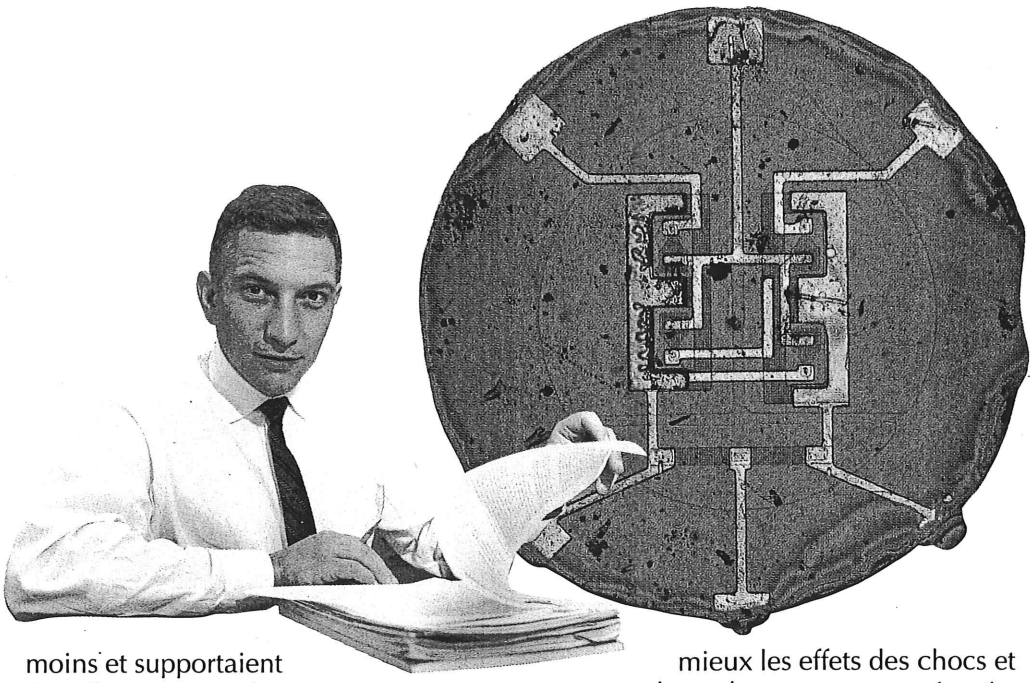
avait de nombreux avantages sur le transistor à jonction de type meule. Avec cette dernière technique, la surface en cloche de la puce offrait des niches qui parfois ramassaient des poussières capables de contaminer la puce, et le fil connecté à l'émetteur au sommet de la meule se détachait souvent. Le plus important, c'est que le transistor planaire était intrinsèquement plus fiable que le transistor à jonction et demeurait plus économique à produire.

Robert Noyce, collègue de Hoerni chez Fairchild, comprit que cette méthode offrait de grandes possibilités pour la fabrication de transistors. Tout d'abord, il réalisa que cette technique pourrait également permettre de produire d'autres composants électroniques sur une plaque de silicium. Ensuite, puisque le transistor de Hoerni était plat, Noyce proposa de se passer des fils de liaison en créant d'étroits canaux conducteurs à la surface du silicium. Sauf là où ils devaient être connectés, ils seraient isolés des autres éléments de la puce par la couche en silice isolante de Hoerni.

La puce de Noyce servit de prototype à tout ce qui suivit. Elle était simple et elle fonctionnait. Qui plus est, elle pouvait être produite en masse grâce aux techniques déjà utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs. En 1961, Fairchild et Texas fabriquaient des puces de type planaire, et les deux firmes diffusaient les circuits intégrés à grande échelle. L'ère de la puce avait commencé.

FRAÎCHEMENT ACCUEILLI

Au départ, l'industrie électronique et l'armée accueillirent le circuit intégré avec beaucoup de scepticisme. Par exemple, la marine et l'armée de l'Air rejetèrent sur le champ les premiers circuits commerciaux de Texas Instruments. L'armée passa un petit contrat de développement avec la compagnie, mais seulement dans l'espoir que les puces pourraient être assemblées en micromodules. Pourtant, les circuits intégrés avaient beaucoup à offrir. Ils étaient fiables. Les puces envoyées aux clients fonctionnaient toujours comme promis. Les circuits intégrés étaient également plus rapides et beaucoup plus compacts que les circuits composés de transistors séparés. Ils exigeaient moins de puissance, ils chauffaient beaucoup



Au début de 1959, Robert Noyce, de Fairchild, construisit un circuit intégré sur une fine tranche de silicium. Les conducteurs métalliques encastrés *(blanc),* reliés aux transistors coniques et aux résistances allongées *(bleu)* éliminaient les fils de la puce de Kilby et la production de masse en était facilitée.

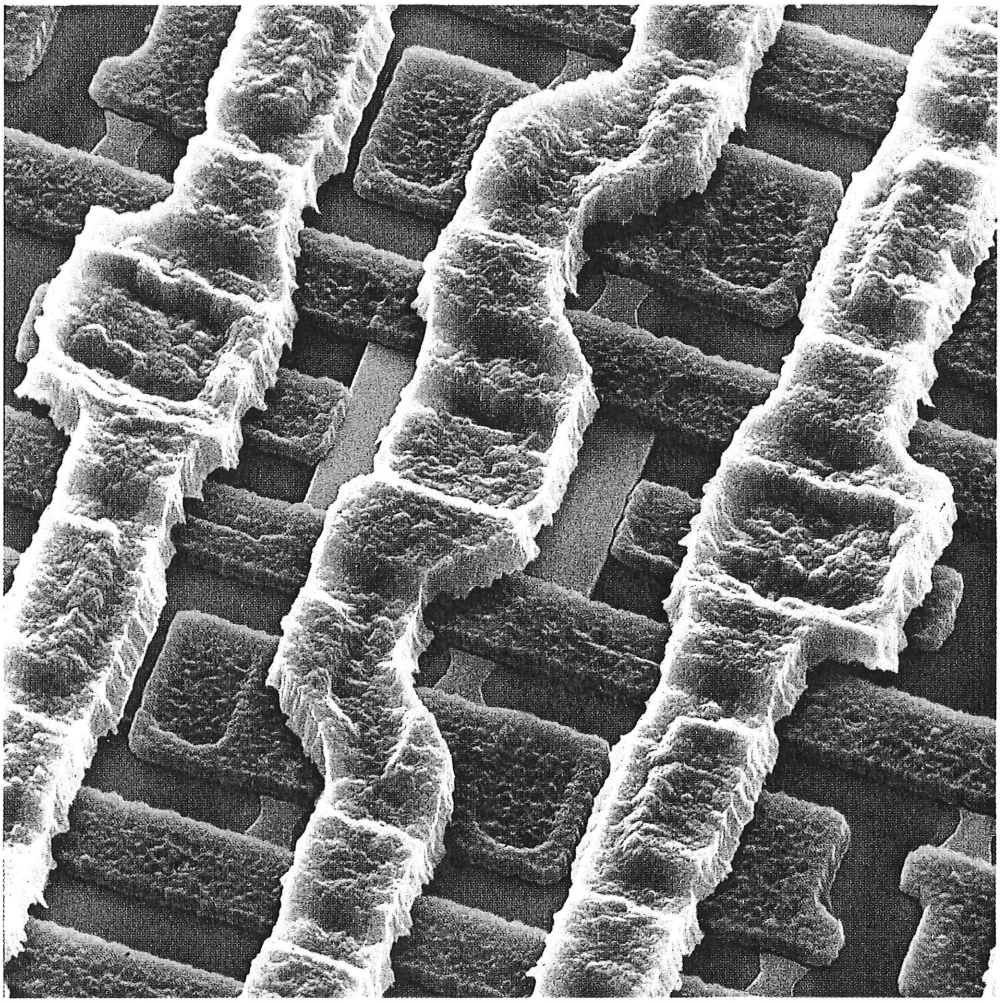
moins et supportaient mieux les effets des chocs et des vibrations que les soudures des composants séparés.

Mais demeurait une difficulté essentielle: les puces étaient trop onéreuses. Les premiers modèles étaient plus coûteux que les circuits conçus avec des composants séparés, même en tenant compte du coût d'assemblage, plus élevé, de la technologie régnante. Par exemple, le premier circuit commercial de Texas Instruments, un dispositif appelé bascule, qui peut servir à stocker un unique bit de donnée, coûtait 450 dollars. Un circuit similaire pouvait être assemblé à partir de composants séparés pour quelque cinq dollars. Ce prix élevé était probablement justifié. Dessiner une puce représentait une discipline nouvelle et de longue haleine; les ingénieurs devaient apprendre à associer composants et câblages en un ensemble intégré, conception que Kilby avait dénommée dispositif monolithique plutôt que de considérer la forme et la fonction comme des débouchés séparés. La fabrication d'un tel dispositif demandait beaucoup de soin; des procédés imparfaits produisaient de nombreuses puces défectueuses. Dix pour cent seulement des puces produites étaient vendables.

LANCÉE PAR LA FUSÉE LUNAIRE

Trop onéreuse pour pénétrer les grands marchés de l'électronique comme les télécommunications, la puce semblait bloquée sur la ligne de départ. Sans un immense accoissement de la demande, le volume des puces produites demeurerait faible et les prix resteraient élevés. Mais au printemps 1961, la situation prit un tour tout à fait favorable. En mai, le président Kennedy déclara au Congrès: «Je pense que nous devons aller sur la Lune, je pense que notre nation doit s'investir pour réussir, avant la fin de cette décennie, à poser un homme sur la Lune et le ramener sain et sauf sur Terre.» Le rêve des spécialistes de fusées, qui s'appelerait projet Apollo, allait devenir réalité, et la puce en silicium allait constituer la solution idéale pour un ordinateur de 10 millions de composants.

«Le programme spatial avait un besoin impérieux des possibilités offertes par le circuit intégré, dit Kilby. Ils en avaient un tel besoin qu'ils étaient prêts à en payer



Agrandies 8 750 fois par un microscope à balayage électronique, des lignes conductrices en métal — argent et cuivre sur cette image — s'entrecroisent à la surface d'une puce mémoire. Le métal a été déposé en deux couches afin d'augmenter le nombre de connexions entre les transistors, dont des portions apparaissent en zones plates et grises sous les lignes conductrices.

À mesure que progressait la miniaturisation, le coût de chaque composant électronique de la puce diminua de façon spectaculaire. Tous les éléments d'une puce étant disposés en même temps, l'ajout de 10 000 composants sur une puce n'augmente guère le coût de production. C'est ainsi qu'en 1971 les puces mémoires pouvaient stocker 256 bits de données à environ 10 centimes le bit. Deux ans plus tard, le nombre était de 1024 bits à 3 centimes le bit. Au début des années 1980, une puce mémoire de 16 000 bits coûtait 12 centimes les 1 000 bits.

À PROBLÈMES NOUVEAUX, SOLUTIONS NOUVELLES

Les changements dans l'industrie des semi-conducteurs dépassèrent le niveau de la fabrication. Les chercheurs, forcés de travailler sur des circuits de plus en plus complexes et de plus en plus petits, rencontraient parfois des pièges imprévus. Par exemple, la résistance électrique d'un fin tracé conducteur en aluminium décroît plus vite que prévu lorsqu'est réduite la largeur du conducteur. Une résistance plus élevée accroît davantage que prévu le dégagement de chaleur. La chaleur

représente non seulement une perte d'énergie, mais elle menace la puce elle-même qui lâche plus vite, à haute température. Pour compliquer les choses, le silicium dopé n'est pas un conducteur parfait car les porteurs de charges, électrons et trous, rencontrent, en se déplaçant à travers le réseau cristallin, une résistance due aux frottements à l'échelle atomique. Pallier cette résistance exige un peu d'énergie, laquelle est convertie en chaleur. En outre, l'électricité peut fuir à travers les couches isolantes, et la puce fonctionne mal. Peu à peu, un ensemble de règles de conception se dégagea, permettant aux ingénieurs d'affronter ces problèmes, du moins pour un temps.

Un nouvel ensemble de critères pour la conception d'un bon circuit fut défini. À l'époque des composants séparés, les ingénieurs électroniciens avaient intérêt à incorporer le maximum de capacités et de résistances bon marché et le minimum de diodes et de transistors onéreux. Mais, dans un circuit intégré, les résistances et capacités prenaient davantage de place sur la précieuse tranche de silicium que les diodes et les transistors. En conséquence, les spécialistes inventèrent de nouveaux circuits qui réduisaient ou même éliminaient complètement l'utilisation des résistances et des capacités au profit des diodes et transistors moins onéreux. Par exemple, un transistor dans lequel le courant de base est faible peut servir à limiter le flux électrique, tout comme une résistance.

Alors que les ingénieurs essayaient de serrer davantage d'éléments sur la tranche de silicium, les problèmes de consommation d'énergie et d'échauffement qui en résultaient menaçaient de devenir insurmontables. Fabriquer des éléments de circuits plus petits permet de réduire la consommation d'énergie, mais pas au point de compenser le besoin de puissance, toujours accru du fait du nombre plus élevé d'éléments que les ingénieurs ajoutaient sur une puce. Le dégagement de chaleur augmentait en même temps que la consommation, jusqu'à ce que les circuits commencent à tomber en panne.

Pour neutraliser cet effet, les spécialistes ajoutèrent des ventilateurs aux ordinateurs ou réfrigérèrent les circuits. Ils attachèrent des radiateurs aux puces, similaires aux ailettes de refroidissement des moteurs de tondeuses à gazon, qui maintenaient la température dans les limites admissibles. Mais ce n'étaient que des palliatifs. Le véritable remède fut un nouveau type de transistor.

Le transistor bipolaire, qui avait la faveur des ingénieurs dans les années 1960, existait en deux modèles, selon que la base était faite de silicium type P ou type N. Dans un transistor bipolaire P-N-P, par exemple, une base en silicium de type N est prise en sandwich entre les zones émetteur et collecteur en silicium type P. Dans un transistor N-P-N, la séquence est inversée. Le N-P-N était le plus commun des deux parce plus rapide et plus facile à fabriquer.

Dans le transistor N-P-N, le collecteur est relié au côté positif du circuit, l'émetteur au côté négatif. En raison de l'attraction de l'électrode positive, les électrons de charge négative du collecteur se rassemblent de ce côté, et les électrons de l'émetteur se groupent à la jonction de l'émetteur avec la base. Afin que les électrons traversent la base, donc pour que le courant circule, il faut élever la tension de la base afin de tirer le courant de l'émetteur. De ce fait, l'application d'une faible tension positive à la base ferme le transistor. Une tension négative à la base réduit le flux d'électrons, ouvrant le transistor.

Les transistors bipolaires sont rapides comme l'éclair; certains peuvent passer d'ouvert à fermé en moins d'un milliardième de seconde. Le facteur principal qui

deux ou trois fois le prix. » Le prix ne comptant plus, un énorme marché s'ouvrit soudain aux puces. Pratiquement du jour au lendemain, le gouvernement s'engagea à acquérir les nouveaux circuits intégrés destinés à guider le vaisseau spatial vers la Lune à l'aller comme au retour. La production des puces quadrupla chaque année, entre 1963 et 1966, en grande partie grâce aux commandes de la NASA et à une petite aide de l'armée de l'Air et de la marine, dont les missiles balistiques intercontinentaux Minuteman II et Polaris comportèrent des circuits intégrés à partir de 1962. Quand le module lunaire Eagle toucha la Lune, le 20 juillet 1969, le programme Apollo avait acheté à lui seul plus d'un million de puces. Le circuit intégré était le roi de l'industrie électronique.

Comme prévu, de nouveaux marchés s'ouvrirent quand le prix des puces baissa de quelque 50 % chaque année en raison de l'accroissement de la production. Avec l'argent du programme Apollo et des contrats militaires, Texas Instruments et Fairchild, tout comme les autres compagnies qui s'étaient mises à la fabrication des puces, étaient en mesure d'investir les vastes sommes nécessaires pour améliorer la conception et les techniques de fabrication. Les chercheurs de Motorola, par exemple, trouvèrent une raison impérative pour réduire la taille des puces: les petites avaient davantage de chances de fonctionner que les grosses parce qu'elles risquaient moins de comporter des défauts dans le silicium dont elles étaient faites ou de rencontrer des poussières. Si dix puces sont construites sur une tranche ayant cinq défauts ou poussières, cinq seulement marcheront. Mais en en plaçant quarante sur la tranche, trente-cinq d'entre elles fonctionneront — soit un accroissement de sept fois à la sortie pour une réduction de quatre fois la taille des composants.

AMÉLIORER L'INTÉGRATION

En pratique, les résultats étaient meilleurs encore. Les ingénieurs découvrirent que les incidents de production, dûs aux grains de poussière ou à d'autres défauts dans le silicium, n'étaient pas répartis au hasard à la surface de la tranche de silicium utilisée pour la fabrication des puces. Au contraire, ces défauts n'existent que dans des régions limitées de la tranche. Sur une plaquette de quarante puces, les défauts ont davantage de chances de se trouver sur une zone couverte par deux puces plutôt que par cinq. De ce fait, réduire la taille de chaque circuit intégré apportait un bénéfice bien supérieur à celui prévu.

Un des domaines d'amélioration consistait en des techniques utilisées afin de construire les circuits sur les tranches de silicium. En fait, le procédé permet d'imprimer conducteurs et isolants couche sur couche, sur le dessus de la tranche de silicium dopé. Une amélioration du détail dans l'impression, faite en projetant les dessins des conducteurs et des isolants sur un matériau, type stencil, sensible à la lumière, amena une meilleure définition des éléments du circuit et permit une plus grande intégration. Afin de trouver une solution au plus gros problème dans la fabrication des puces, la poussière, furent mises en service des chambres propres qui ne renfermaient pas plus de quatre grains de poussière par litre. En comparaison, le niveau de poussière dans une chambre d'hôpital moderne est d'environ 400 particules par litre. Des vêtements spéciaux furent dessinés pour les ouvriers en vue d'empêcher poussières, peluches, pellicules et squames de tomber sur le silicium. De nouveaux systèmes de ventilation furent créés afin de filtrer et recycler continuellement l'air dans les ateliers *(pages 78-79)*.

détermine la vitesse de réponse d'un transistor est l'épaisseur de la base. Une base mince réduit le temps nécessaire à un électron pour passer de l'émetteur au collecteur. Mais son prix est élevé. La puissance doit être appliquée à la base du transistor et la chaleur continue à se dégager, que le système soit ouvert ou fermé. En outre, les difficultés pour construire la version planaire, relativement simple, du transistor bipolaire étaient devenues accablantes à mesure que s'accroissait l'échelle d'intégration. Une puce plus simple serait commode; celle qui consommerait moins de puissance était une nécessité. La solution fut offerte par le transistor métal-oxyde-semi-conducteur, ou MOS. Le nouveau dispositif allait consommer moins de puissance, mais aussi prendre moins de place.

UN TRANSISTOR À UNE SEULE VOIE

Dans cette sorte de transistor, seuls les électrons ou les trous, mais jamais les deux, transportent le courant d'une électrode à l'autre. De ce fait les transistors MOS sont connus comme dispositifs unipolaires. Dans le transistor NMOS, le courant est dû aux électrons. Ce transistor consiste en deux îles de type N encastrées dans un substrat de silicium de type P. Des conducteurs en aluminium sont reliés directement à ces îles. Dans un transistor à jonction, ces îles seraient appelées émetteur ou collecteur; dans un transistor MOS, l'une est dite source, l'autre drain. La zone de silicium de type P entre la source et le drain est appelée canal. Une fine couche de silice (oxyde de silicium) isolante recouvre le canal, et une couche de métal appelée porte est déposée au-dessus du canal sur l'oxyde qui isole l'aluminium de la source et du drain. La porte est analogue à la base du transistor à jonction. Dans un transistor NMOS le drain est relié au côté positif du circuit et la source au côté négatif. En l'absence de tension à la porte, le transistor est ouvert; les trous dans le canal de type P empêchent les électrons d'aller de la source au drain. Quand une tension positive est appliquée à la porte, le champ électrique créé passe à travers l'oxyde, repoussant du canal les trous de charge positive et attirant les électrons. Il en résulte une microscopique région mince de silicium riche en électrons dans le canal, permettant au courant de couler de la source au drain. En raison du rôle que joue le champ électrique dans le fonctionnement des transistors MOS, ils sont également appelés transistors à effet de champ, ou MOSFET. Inverser les rôles du silicium de type P et de type N produit un transistor PMOS, dans lequel une tension négative est appliquée à la porte et où des trous de charge positive vont de la source au drain. Les transistors NMOS sont un peu plus rapides que les PMOS (les électrons se déplacent plus vite que les trous dans le transistor), mais les transistors PMOS sont moins chers à fabriquer parce qu'ils tolèrent mieux que les NMOS les impuretés dans la tranche de silicium. L'idée qu'un courant dans les semi-conducteurs puisse être influencé par un champ électrique était ancienne dans cette technologie encore immature. William Shockley, le chercheur de Bell crédité de l'invention du transistor, avait constaté le phénomène en 1948. Pourtant, l'effet du champ était si capricieux — faible dans certaines expériences, fort dans d'autre — qu'à l'époque il était considéré comme une simple curiosité.

Les recherches ultérieures montrèrent que ce problème était lié aux impuretés dans la couche de silice isolant l'électrode qui produisait le champ. Quand cet oxyde de silicium était pur, l'effet de champ était fort. Mais la moindre trace d'une substance étrangère dans la silice diminuait ses capacités isolantes et

permettait à la tension d'atteindre la couche sous-jacente de silicium, condition qui annulait ou diminuait fortement l'effet de champ. À la fin des années 1950, le physicien John Atalla dirigeait un groupe d'expérimentateurs qui cherchaient comment augmenter la pureté des revêtements de silice pour transistors, afin d'améliorer la qualité des transistors bipolaires de l'époque plutôt que pour des applications à l'effet de champ. S'ils avaient pu disposer de silice ayant un haut degré prévisible de pureté et de pouvoir isolant, la fabrication de transistors fiables aurait été plus aisée. L'équipe d'Atalla trouva une manière de se débarrasser des impuretés dans la silice, procédé qui les mena à concevoir l'idée d'un transistor à effet de champ. En juin 1960, Attala et son collègue Dawon Khang firent la démonstration d'un tel dispositif. La mise au point d'un transistor MOS utilisable prit six ans, les chercheurs se démenant pour créer des couches pures de silice sur des tranches de silicium.

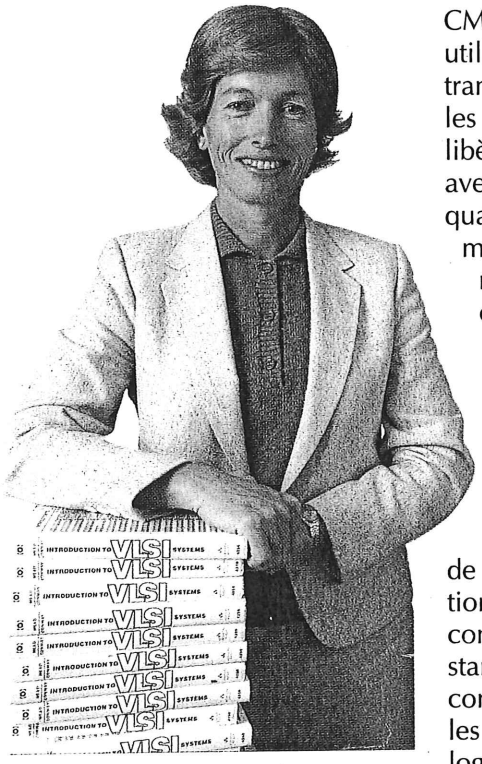
UNE STAR DE PREMIER ORDRE

Le résultat s'avéra à la hauteur de l'attente. Bien que les transistors MOS soient en eux-mêmes plus lents que les modèles bipolaires (avant qu'un courant ne circule, un instant supplémentaire est requis pour tirer les électrons dans le canal du transistor MOS et le fermer), ils font davantage que compenser cette perte de temps. Ainsi consomment-ils très peu de puissance et, du coup, ne chauffent pas beaucoup. Quand un transistor MOS est ouvert, il ne consomme pas d'énergie du tout puisque la porte est maintenue au potentiel zéro volt. À l'inverse, la base d'un transistor bipolaire exige toujours l'application d'une tension, et un ordinateur monté avec des transistors bipolaires doit utiliser un système de refroidissement plus important. La consommation et le dégagement de chaleur des transistors étant très faibles, il est possible de les disposer en bien plus grand nombre sur une pièce de silicium. Les nouveaux dispositifs sont également plus simples à fabriquer et du coup meilleur marché. Produire un circuit de type courant avec des transistors MOS prend 40 % de moins de temps de traitement qu'il n'en faudrait pour bâtir ce circuit avec des transistors bipolaires. De ce fait, quand les transistors MOS furent introduits, au début des années 1970, ils alimentèrent des niveaux d'intégration plus élevés.

VARIATIONS SUR UN THÈME

Pour les concepteurs de circuits, plusieurs sortes de technologies MOS furent bientôt disponibles, la plus répandue étant le CMOS, ou MOS complémentaire. De tels dispositifs sont réalisés en associant sur une seule puce des transistors NMOS et PMOS. L'inverseur en est un bon exemple, qui transforme les 0 en 1 et vice-versa. Baptisé également porte NON *(pages 42-43)* l'inverseur joue un rôle essentiel dans des opérations de calcul aussi fondamentales que l'addition d'une paire de nombres. Bien qu'il soit plus compliqué que les circuits MOS standards, et par suite plus onéreux, le procédé associant un transistor NMOS à un transistor PMOS assure aux circuits logiques à base de CMOS une consommation inférieure à celle de tout autre type en service, ce qui permet aux fabricants d'ordinateurs de construire des ordinateurs personnels sur batterie, portables. Les microprocesseurs au centre des ordinateurs personnels les plus avancés utilisent presque exclusivement des circuits CMOS à cause de leur faible consommation.

À ce peu d'appétit d'électricité correspond le plus gros avantage des circuits



Lynn Conway s'appuie sur une pile d'exemplaires de *Introduction aux systèmes VLSI,* l'ouvrage de référence sur la conception des puces qu'elle écrivit avec Carver Mead. Sa présentation directe des règles et des méthodes pour créer des circuits intégrés complexes permit de démythifier la science du dessin des puces.

CMOS : ils dégagent encore moins de chaleur que les transistors NMOS ou PMOS utilisés seuls. Le microprocesseur type d'un petit ordinateur monté avec des transistors NMOS transforme quelque 1,7 watt d'électricité en chaleur. Ajouter les puces mémoires et autres circuits, également bâtis avec des transistors NMOS, libère à peu près trente fois autant de chaleur. Dans un microprocesseur monté avec des transistors NMOS, la température de la puce peut atteindre jusqu'à cinquante degrés Celsius, exigeant l'utilisation de radiateurs et de ventilateurs. Si le même microprocesseur et les puces mémoires étaient construits selon la technologie CMOS, la consommation d'énergie serait inférieure de 90 %. En conséquence, la température de la puce s'élèverait de moins de cinq degrés Celsius, et aucun système de refroidissement ne serait plus nécessaire.

CONCEVOIR LA PUCE

À mesure que s'élevait le nombre des composants dans un circuit intégré, les schémas possibles proliférèrent, impliquant la possibilité de nouveaux choix et de nouvelles limites. Dans les années 1970, à l'ère de l'intégration à grande échelle, les concepteurs devaient suivre les progrès des milliers de connexions et de composants mis en jeu. Mais quand survint l'ère de l'intégration à très grande échelle, les concepteurs de puces durent encore accroître leurs connaissances. Ils eurent à apprendre les variations des règles de conception standard utilisées par les sociétés pour lesquelles ils travaillaient. Ils devaient connaître les techniques de fabrication et l'ordre dans lequel s'effectuaient les diverses étapes de traitement. Il leur fallait posséder de fabuleuses capacités logiques pour percevoir comment des centaines de milliers, des millions et même des milliards de composants pouvaient être assemblés sur une puce de la taille d'un timbre poste. Rien d'étonnant à ce que de tels individus aient été rares.

Au commencement de l'ère de l'intégration à grande échelle, la conception était une sorte de magie noire enseignée à quelques élus au sein de l'entreprise par d'autres qui portaient le titre de maître-concepteur. Le petit nombre de concepteurs, et le temps nécessaire pour les former, avaient maints effets négatifs sur le pas de l'avance technologique.

Dessiner une puce était un processus lent et les trop rares concepteurs disponibles mettaient des années à créer un nombre relativement petit de nouvelles puces. En outre, les entreprises qui avaient besoin d'une petite quantité de puces adaptées à un but particulier n'étaient pas les mieux placées. Les puces taillées sur mesure n'étaient économiques que pour des applications en exigeant des milliers ou pour des sociétés qui avaient les moyens d'en payer les énormes coûts d'ingénierie. Il y avait là un goulot d'étranglement.

LES VISIONNAIRES DE LA PUCE

Deux ingénieurs, membres de l'élite des concepteurs : Carver Mead, professeur d'ingéniérie électrique au California Institute of Technology, et Lynn Conway, alors professeur d'ingénierie à l'Université du Michigan, fournirent la solution à ce problème. Leur collaboration remonte à 1975, quand Conway, qui travaillait alors pour Xerox, voulut créer une association Xerox-Caltech et mit en route ce qui allait devenir le Silicon Structures Project. « Je travaillais sur une architecture à usage spécial pour le traitement d'image », rappelait Conway, qui étudiait l'électricité à l'Université de Columbia. « J'avais fini par être au courant du vide qui

existait entre le genre de système que nous pouvions visualiser et ce que nous pouvions obtenir comme machine dans un délai raisonnable. »

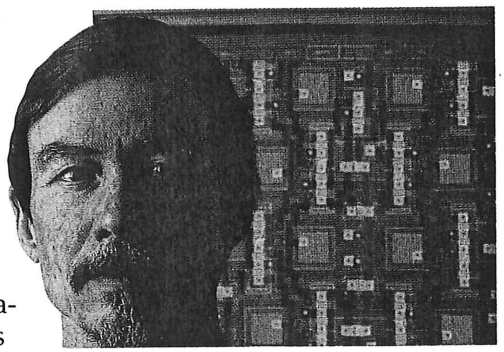


Figure marquante dans le développement du dessin des puces, Carver Mead, du California Institute of Technology, a élargi les frontières de la technologie des circuits intégrés grâce a des puces expérimentales qui tentaient de rivaliser avec la puissance du cerveau humain. En arrière plan, sont visibles des détails de son dessin d'une puce destinée à imiter la vue. Les carrés verts sont des détecteurs de lumière.

Mead, qui avait été au Caltech depuis qu'il était jeune étudiant, se considérait comme un «résident». Les deux ingénieurs se lancèrent dans la recherche de moyens pour améliorer le matériel des systèmes à haute intégration. Leurs conversations et aussi leurs réflexions sur le sujet débouchèrent sur un livre qui révolutionna la pratique du dessin des circuits intégrés. *L'introduction aux systèmes à très grande échelle d'intégration,* représente le point culminant du Xerox-Caltech Projet. Il lança nombre de techniques qui servent de base à la création de n'importe quel type de puce, quelle que soit sa complexité. Les auteurs énonçaient les règles pour relier les transistors à effet de champ en réseaux logiques, aidant ainsi les ingénieurs systèmes à visualiser le tracé des circuits. Ces règles sont fondamentales; elles sont formulées indépendamment des limites de fabrication, telle que la ligne la plus étroite qui, une fois convertie en aluminium dans la puce terminée, conduira le courant comme prévu. Ce livre contenait aussi les directives permettant de déterminer quelle surface de silicium occuperait une fonction logique donnée. Conway et Mead formulaient des hypothèses sur des questions telles que la largeur du métal par rapport au silicium.

Bien que cette information n'ait pas l'air sensationnelle, elle demeurait jusque-là l'apanage d'une poignée de concepteurs. Le texte démythifiait la conception des puces et révolutionnait l'art de fabriquer des circuits intégrés. Subitement, les connaissances et l'expérience des maîtres concepteurs en puces devenaient disponibles en librairie. «En électronique toute information nouvelle arrive par bribes, déclara Conway. En général quelqu'un écrit un livre après coup. Ce que nous voulions, c'est écrire un livre pendant que tout se passait encore. »

Avant même que le livre soit publié, en 1978, Conway mit des copies du premier chapitre dans sa voiture, les emporta au Massachusetts Institute of Technology de Boston, et s'en servit pour faire un cours qui devint légendaire. Mead enseigna la même chose au Caltech. L'impact de leur travail fut immédiat. Avant Conway et Mead, il existait tout au plus quelques cours sur la conception des circuits à grande et très grande échelle. Dès qu'apparut leur bible sur la conception des puces, presque toutes les grandes écoles d'ingénieurs offrirent un enseignement au cours duquel les élèves dessinaient leurs propres puces en l'espace d'un semestre. Les firmes commencèrent à organiser des séminaires dans le but d'enseigner à leurs concepteurs la méthode de Mead et Conway.

En conséquence, des centaines de concepteurs bien formés purent entrer dans l'industrie. Dans le passé, seules les sociétés fabriquant les puces et qui en produisaient d'énormes quantités à usage général, pouvaient se permettre d'avoir à leur service une équipe de concepteurs en circuits intégrés. À l'heure actuelle, un grand nombre d'entreprises plus petites, fabricants de claviers électroniques, d'électroménager ou même de jouets qui reposent sur l'utilisation des puces, ont les moyens d'employer des concepteurs qualifiés. Qui plus est, dans une industrie

où toutes les capacités de production étaient aux mains des fabricants de puces comme Fairchild, Intel et Texas Instruments, les concepteurs de talent et les puces qu'ils avaient créées avaient engendré « des fonderies de semi-conducteurs », selon Conway, des usines qui fabriquaient des puces finies.

VERS LA CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

Bien que Conway et Mead aient établi de nouvelles règles pour la conception des puces, les étapes mises en jeu pour obtenir un circuit intégré en état de fonctionner étaient toujours celles qui avaient dominé l'industrie des puces depuis les premiers jours. Le type de transistor et les règles de fabrication utilisées dans une société servent de base à la fabrication des puces. À partir de là, le concepteur dispose les transistors, les autres composants, et les interconnexions entre eux, de manière que la puce accomplisse la fonction projetée. La schématique logique en résultant est alors convertie en réseaux de composants qui seront utilisés pour fabriquer la puce. Un réseau est testé afin de déceler les défauts électriques et les fautes logiques. S'il passe le test, le circuit est fabriqué et mis en vente.

Dans les années 1960, la schématique logique était créée à la main, le concepteur de puce préparant une esquisse du circuit comme s'il utilisait des composants séparés. Un dessinateur-concepteur redessinait alors le diagramme résultant en schémas de silicium, isolants et bandes conductrices en aluminium. Aujourd'hui, les concepteurs de puces travaillent très peu sur le papier, mais utilisent des programmes de conception assistée par ordinateur (CAO).

En général, de tels programmes comportent une bibliothèque de dessins pour les composants silicium — transistors, diodes, résistances et capacités — avec la possibilité de déplacer ces composants sur l'écran d'un poste de travail sur ordinateur. Dans certains cas, la bibliothèque peut contenir des sous-ensembles complets habituellement utilisés dans les puces, tels des étages tampons pour le stockage temporaire des données, des bascules servant de mémoires, et des multiplexeurs pour augmenter le volume de données transmissibles sur un fil. En combinant l'usage des touches et de la souris — dispositif d'entrée qui permet à l'utilisateur de pointer un objet sur l'écran et de modifier sa position —, le concepteur sélectionne les éléments nécessaires pour la puce et les dispose selon des schémas permettant à la puce de faire le travail qui lui est demandé. La manière de relier ces éléments sur l'écran indique au logiciel CAO comment ils sont destinés à fonctionner ensemble, base des tests informatisés du schéma.

Un degré encore plus élevé d'assistance par ordinateur est atteint avec l'utilisation d'un logiciel appelé compilateur silicium. À l'instar du compilateur d'un langage évolué, qui convertit les instructions en anglais d'un programme en 0 et 1 pour l'ordinateur, un compilateur silicium convertit la description des fonctions requises pour un circuit intégré, le plus souvent à l'origine sous la forme de diagrammes de type organique, en un dessin de transistors et autres composants à la surface de la puce. Aussi utiles que soient les ordinateurs pour le tracé et la mise en place des circuits intégrés, ils présentent un défaut majeur. Comparés au travail fait à la main, ils gaspillent l'espace sur la puce. L'ordinateur considère chaque fonction d'un circuit intégré comme un bloc isolé de circuits, qui est ensuite relié aux autres à la surface de la puce. En fait, ces blocs séparés s'ajustent rarement bien, laissant des vides qu'un concepteur utiliserait pour réduire encore les dimensions du produit fini.

Travaillant avec une simulation de tensions hautes et basses en entrées, lancée par le concepteur et représentant le débit saccadé des 1 et des 0 dans le circuit, l'ordinateur calcule les sorties correctes pour l'arrangement du circuit spécifié dans le dessin. Si les résultats sont conformes à l'attente, la logique du circuit est confirmée. Sinon, le dessin peut être revu en déplaçant tout simplement les composants d'un endroit à l'autre sur l'écran.

Le timing, à savoir la coordination dans le temps des actions de la puce, est une source traditionnelle de problèmes. Par exemple, si une opération à un endroit de la puce dépend du résultat d'une opération ayant lieu sur une autre zone de la puce, et que la première tâche soit lancée avant que n'arrivent les données nécessaires à la seconde, ou après qu'elles aient été remplacées par autre chose, la puce ne fonctionnera pas comme voulu. Le logiciel de l'ordinateur recherche les erreurs de timing dans le circuit de la puce et les signale au concepteur, lequel peut en général résoudre le problème en retardant, soit l'arrivée des données, soit le démarrage de l'opération, de manière à synchroniser parfaitement les actions.

Le système CAO pousse les vérifications plus loin pour obtenir l'assurance que toutes les règles de conception qui lui sont propres ont été respectées: que pas un conducteur n'est trop étroit ou placé trop près d'un autre; que les couches isolantes sont suffisamment épaisses et larges pour jouer leur rôle et empêcher les courants de s'égarer; et que les transistors sont assez espacés pour que le travail de l'un n'influe pas sur le comportement du voisin.

Quand le dessin de la puce à franchi tous les tests, le travail est terminé au plan scientifique. Ensuite, c'est à la fabrication d'agir. Exécuter sur le silicium un dessin qui comporte des millions de transistors et des millions de lignes microscopiques afin de les relier représente indubitablement l'ultime défi dans la fabrication d'une puce. Bien qu'il y ait déjà beaucoup de savoir et de talent en action dans la mise au point d'une puce, dispositif électrique capable de manier de gigantesques volumes de données à une vitesse foudroyante, il a fallu investir encore plus d'efforts pour perfectionner leurs techniques de fabrication.